

# 발파진동 파형합성을 이용한 전자뇌관의 최적지연초시에 관한 연구

## Optimum Delay Time of Electronic Detonator using Blast-induced Vibration Waveform Composition

윤지선<sup>1</sup>, 김도현\*<sup>2</sup>

Yoon, Ji-sun · Kim, Do-hyun

### Abstract

When blasting by imposing the time difference between two adjacent charge holes, the mutual interference phenomenon occurs depending the feature of blast. This interference phenomenon of blast amplifies or compensates the blast-induced vibration depending on the overlapping mechanism. Thus, this experiment aims at finding out the optimum delay time by measuring the blast vibration data from the single hole blast during the blasting test and composing each blasting waveform, and at proving the its efficiency by applying the composition delay time in the entire cross section. The experiment showed that the blasting-induced vibration was reduced by endowing an optimum delay time of electronic detonator appropriate to the rock quality of construction site compared to the typical delay time (20, 25ms) of existing detonator (non-electric and electric detonator). From these results, the excavation efficiency using blasting could be enhanced..

**Keywords :** Electronic detonator, optimum delay time, composing blasting waveform

### 요 지

두개의 장약공에 시차를 주고 발파할 경우 파의 특징인 상호 간섭현상이 발생한다. 이러한 파의 간섭현상은 중첩을 통하여 파가 서로 증폭이 되거나 상쇄가 된다. 따라서 이러한 파의 특성을 이용하여 시험발파 시 단공발파를 통한 발파진동 데이터를 측정하여 각각의 파형을 합성한 뒤 최적지연초시를 찾고 이 합성초시를 전단면에 적용하여 그 효율성을 입증하는데 이번 실험의 목적이 있다. 기존뇌관(비전기, 전기뇌관)의 정형화된 초시(20, 25ms)가 아닌 현장암질에 적합한 전자뇌관의 최적초시를 도출하여 발파 진동을 최소화 하고 굴착효율을 높이는 발파 굴착공법의 개발을 모색하고 시험시공을 통한 현장 적용성을 평가하였다.

**주요어 :** 전자뇌관, 최적지연초시, 파형합성

## 1. 서론

우리나라는 지난 20년 동안 사회 간접시설(도로, 철

도, 전력, 통신시설 등)의 소 단면 터널건설에 급속한 발전을 이룩하여 양과 규모면에서 국제적 상위위치에 있다 할 수 있으나 대형 지하 공간 건설기술 능력은 아직은

1 정희원, 인하대학교 토목공학과 교수

\*2 (주)바우컨설팅 지반터널부 사원 (extrani@hanmail.net)

미흡하다고 판단된다. 하지만 대형대단면 지하 공간 창출에 대한 수요는 점차 커지고 있다. 터널의 규모 확대에 따른 발파 굴착 시 굴진효율을 높이고 발파 진동을 저감시키며 공기단축과 공사비용 절감을 위한 발파 굴착 기술의 개발이 시급한 실정이다. 오늘날 일반화되어 발파 현장에서 사용되고 있는 전기뇌관과 비전기뇌관의 경우 정밀도가 MS(Milli Second) 단위까지 이르렀으나, 뇌관 지연시차의 부정확성과 정밀성 부족으로 인해 진동과 소음의 환경피해와 발파효율의 감소를 초래하고 있다.

본 연구에서는 이러한 터널의 대단면, 장대화에 따른 기존 뇌관의 문제점을 보완하고 효과적인 발파를 위해 전자뇌관을 사용해 기존뇌관(비전기, 전기뇌관)의 정형화된 초시(최소20-25ms, 최대 수 천 ms)가 아닌 현장 암질에 적합한 전자뇌관의 최적초시를 도출하여 발파 진동을 최소화 하고 발파 효율을 최대화 시키는 굴착공법의 개발을 모색하고 실제 시공을 통한 현장 적용성을 평가하고자 한다.

## 2. 전자기폭시스템의 구성 및 특성

1990년대 초반에 전자 타이머에 의해 초 정밀시차로 특수한 용도에 사용하기 위해 개발된 전자 뇌관(Electronic detonator)은 단차별 기폭 시간에 대한 단차별 정밀도와 지연시차의 부여방법에서 기존의 기폭 시스템과 많은 차이를 보인다. 기존 뇌관(MS, DS)의 경우 단차별 오차범위가 후단으로 갈수록 50ms이상의 큰 오차가 날수 있는 데 반하여 전자뇌관의 경우 단차별 0.2ms이하의 오차범위로 Controlled blasting(터널의 경우 smooth blasting)이나 적정 파쇄입도를 원하는 석산이나 광산 등에서 사용목적에 따라 보다 적절하

게 대처할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

전자 뇌관의 특성을 요약하면 다음과 같다.

뇌관 내부의 지연요소로 디지털 제어장치 즉 전자 IC 회로를 사용한 뇌관이다.

전자뇌관은 각 뇌관 당 보통 1ms 단위로 자유롭게 지연시차 부여가 가능하므로 지반에 따른 발파진동 전파특성을 파악 후 지발 당 최적초시 설계를 통하여 발파에 의해 야기되는 지반 진동을 효과적으로 통제할 수 있다.

기존 뇌관(DS, LP)의 경우 후단으로 갈수록 일반적으로 50ms이상의 허용 오차 발생하나 전자뇌관의 경우 초시의 오차가 단차별로 0.1-0.2ms 이하의 범위에 있다.

각국의 생산기준에 따라 약간의 차이는 있지만 대체로 최소 0-8,000ms(Dynatronic, Germany)에서 최대 0-25,000ms(SASOL, South Africa)까지 1ms의 단위로 생산함으로써 단차 적용 범위의 무한성을 가지고 있다. 표1은 전자뇌관의 특성을 나타낸다.

## 3. 발파진동 및 파형합성

### 3.1 발파진동

발파를 통한 굴착에서는 화약의 폭발 시 발생하는 충격압과 가스압을 이용하여 굴착단면의 암석을 제거하게 된다. 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수 mm - 수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄 되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로부터 3차원적으로 전파되어 온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현

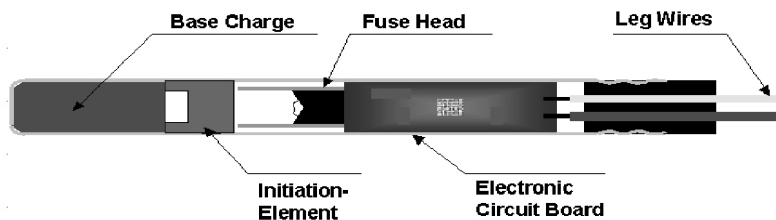


Fig 1. The internal structure of electronic detonator

Table 1. Internal structure of electronic detonator

뇌관 규격	68.6 × 7.6 mm
Shell 재질	Al or Cu
작업온도범위	-40 ~ 70 °C
시차범위	0 ~ 25,000 ms
적용가능 지연시차	1ms 단위 가능
내 정수압	3 ~ 8 bar
내 전자기성	10 KHz ~ 100 GHz
내 정전기성	15 KV
기폭약	PETN, 아지화납

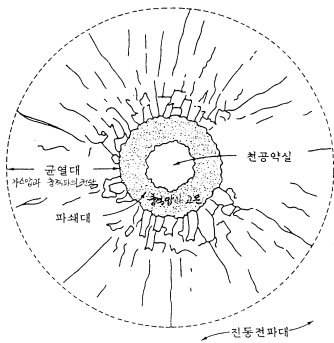


Fig 2. Crack and vibration propagation of blast hole

저히 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중에 전파되어 간다. 이러한 탄성파는 암반 중에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데 이를 발파진동(blast vibration)이라 한다. Fig 2.는 발파 후 천공약실에서 균열과 진동의 전달경로를 나타낸 것이다.

### 3.2 파형합성

파형과 관계없이 전형적인 발파진동은 종선을 따라 시간이나 거리에 따라 변하는 사인파로 근사할 수 있다. 정현파(正弦波)의 +, -수치를 조정하여 시간차를 조절하면 수치합성에 의해 간섭 효과로 진동이 제어되도록 한다. 시차별 발파진동을 상호 간섭시켜 진동소음을 저감시키는 발파로서 보다 상세하게는 복수의 진동원에서 진동을 적극적으로 중복시켜 상호간섭을 통하여 발파진동을 저감시킨다. Fig 3.은 최적초시를 도출하는 과정의 모식도이다.

### 3.3 파형합성 프로그램

발파진동 계측기로 측정된 값을 Blastware 프로그램으로 다운받고 그 파형을 아스키 코드로 변환시켜 텍스

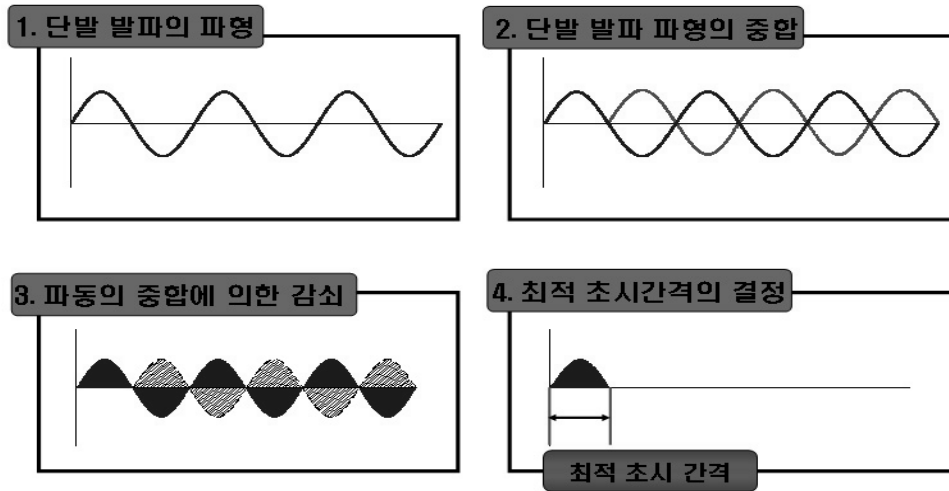


Fig 3. The theory of Blast vibration waveform composition

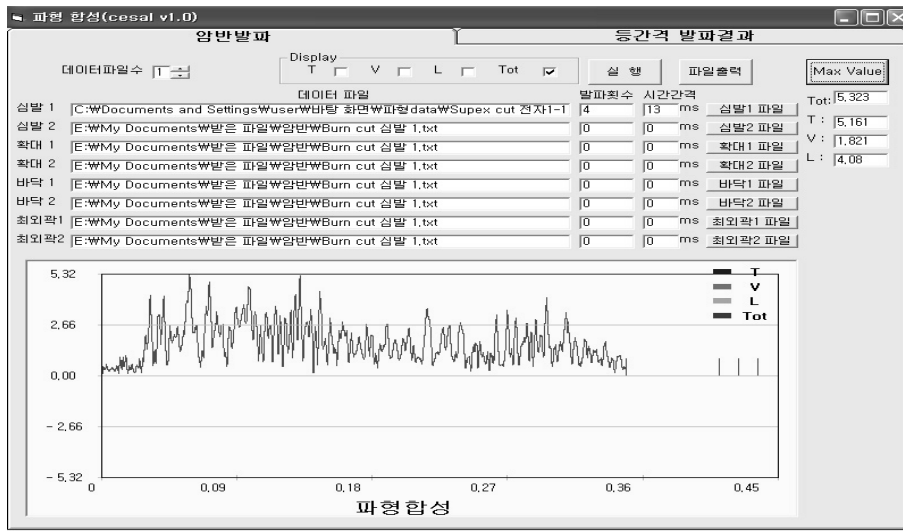


Fig 4. Blast vibration waveform composition program-1

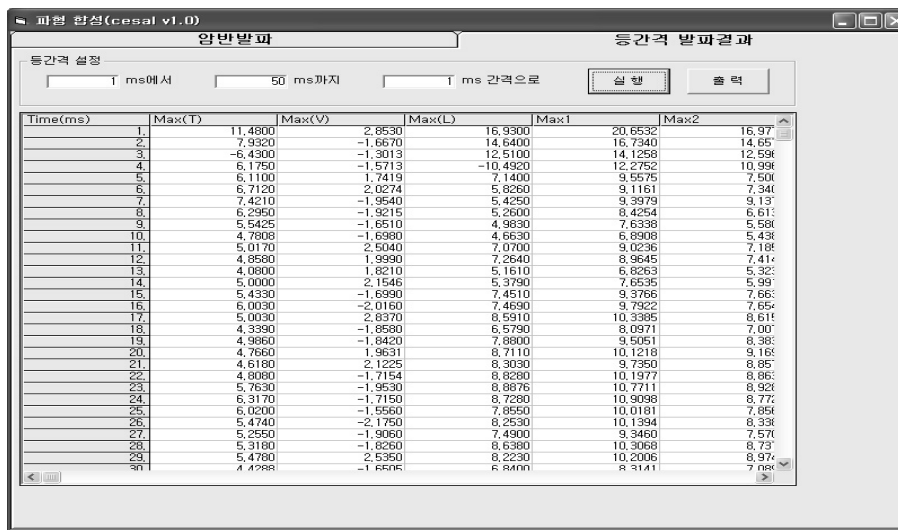


Fig 5. Blast vibration waveform composition program-2

트 파일로 저장한다. 여기서 파형의 범위는 사용자의 요구에 맞게 변환 가능하다. 입력된 텍스트 파일은 현장에서 수행하는 발파 패턴과 동일하게 자유면 효과가 나타나는 각각의 공당 파형을 각 성분별(T,V,L)로 중첩하여 합성할 수 있고 또한 각 성분별 최대값과 PVS 최대값을

나타낼 수 있다. Fig 4.는 독립적인 단발파형을 발파횟수와 시간간격을 변화시키면서 진동이 최소가 되는 초시를 찾는 과정의 한 예이다. 각각의 성분별합인 PVS (Peak Vector Sum)만을 나타냈다. Fig 5.는 1ms에서 사용자가 원하는 초시까지 1ms간격으로 두 단발파형을

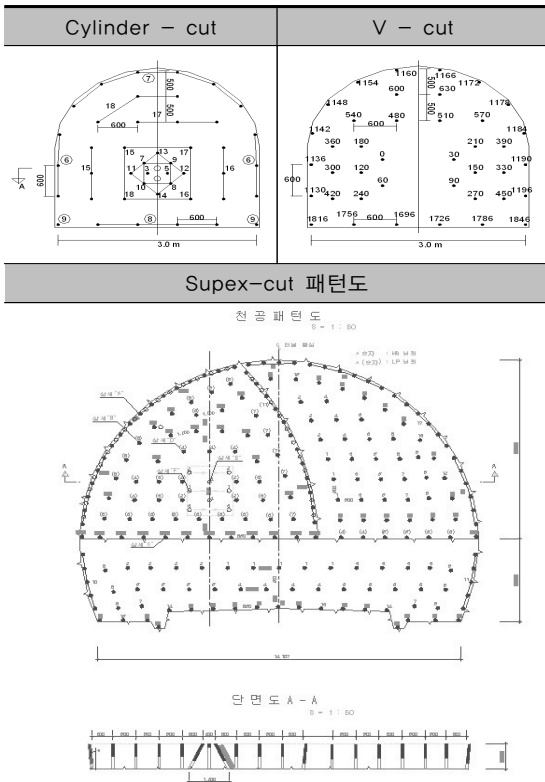


Fig 6. Blast Design Scheme (Cylinder, V, Supex - cut)

합성하는 과정이다. 성분별 최대값을 나타낼 수 있다.

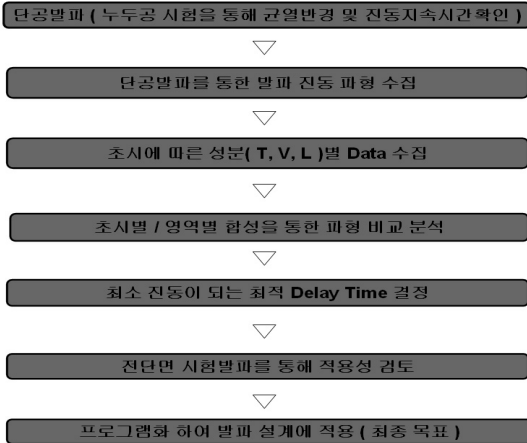
#### 4. 현장 실험

국내 암반에 대해 전자뇌관의 최적초시 도출에 따른 발파효과의 유효성을 검증하기 위하여 다음과 같은 방법으로 연구를 실시하였다. 실험 전에 지질조사를 실시하여 적용암반의 특성을 분석한 후 파형합성을 통해 도출한 최적초시를 적용한 전자뇌관과 일반뇌관의 발파 효과를 비교 분석하였다. Supex-cut과 Cylinder-cut, V-cut의 심발 적용시험을 우선 실시하였다. 현장실험 방법은 동일한 암질에 대하여 일반뇌관 및 최적초시를 적용한 전자뇌관을 사용하여 발파를 시행하고 효과를 비교, 분석한다. 전자뇌관의 최적초시는 본발파 전에 각 공

당 단발발파를 실시하여 단발파형을 획득한 후 파형합성 프로그램을 통해 진동이 최소가 되는 최적초시를 찾는다. 첫 번째 현장실험 장소인 영월 석회석 광산에서는 Cylinder-cut 과 V-cut 공법을 사용하여 비교, 분석하고 두 번째 현장실험인 경부고속철도 13-3공구 터널에서는 Supex-cut 공법을 사용한다.

#### 4.1 현장 실험 순서

독립된 단발파형을 얻기 위해서는 인접공과의 정확한 공간격과 진동과의 지속시간을 알아야 한다. 누두공 시험을 통해 균열반경과 진동지속시간을 확인 후 Fig 6, Fig 7과 같은 패턴으로 단공발파를 실시하여 독립된 발파 진동 파형을 수집한다. 독립적인 두 파형을 1ms 단위로 합성하고 심발, 확대, 바다, 최외곽 등으로 구분하여 영역별로 최적의 초시를 찾는다. 전단면 시험발파를 통해 적용성을 검토 후 합성과정의 프로그램화를 통해 발파 설계에 진동이 최소가 되는 최적지연초시를 갖는 전자뇌관을 적용하는데 그 목표가 있다.



#### 4.2 최적초시 결정을 위한 심발 시험

##### 1) 현장실험 1 : Cylinder-cut , V-cut

심발공법별로 진동파형을 계측한 후 각 영역별로(심발, 확대, 최외곽, 바다) 대표파형을 정해 합성프로그램으

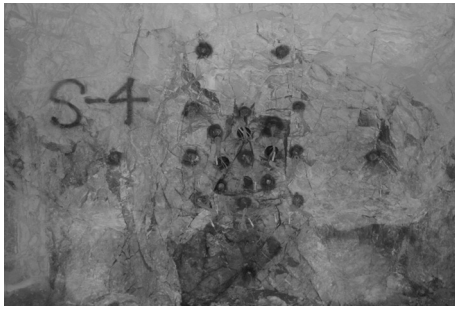


Fig 7. Blast design scheme (Cylinder-cut, V-cut wedge)

심 발 상 세 도

S = 1 : 30

단 면 도 B - B

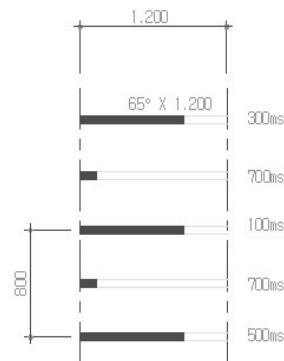
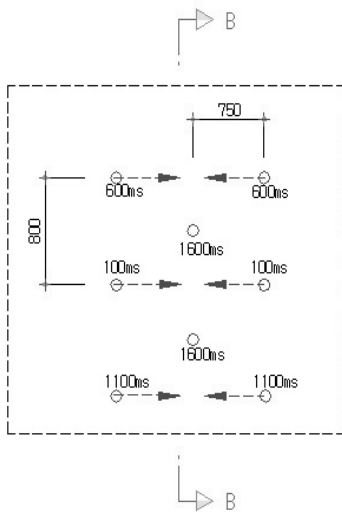


Fig 8. Blast design scheme (Supex-cut wedge)

로 합성 후 영역별 최적초시를 구한다. Fig 7.은 단발파형을 획득하기 위한 단공발파패턴이다. 각 영역별로 계측한 데이터를 8ms~55ms 까지 1ms 단위로 합성했다. 합성범위에서 8ms 전은 제발의 효과를 나타내고 55ms 이후의 합성은 전체적인 발파 시간에 비해 볼 때 적절치 않기 때문에 범위를 한정해서 합성하였다.

2) 현장실험 2 : Supex-cut

정확한 독립파형을 획득하기 위해 Fig 8.과 같이 각각

500ms 시차를 주고 발파를 실시했다. 사압현상을 방지하고 각도공의 효과를 충분히 활용하기 위하여 2지발 발파를 실시했다. 잔여진동의 중첩이 있지만 500ms 이상의 시차를 주면 기대하는 심발효과를 얻을 수 없다고 판단했기 때문에 잔여진동의 중첩은 크게 고려하지 않았다. 500ms 시차를 주고 총 3회의 발파를 실시했다. 1회 발파시 계측기는 5대를 사용했지만 진동의 최대치가 나타날 수 있는 막장면 첫 번째 계측기의 파형을 획득하여 총 12개의 독립파형을 합성하였다.

Table 2. The optimum delay time of electronic detonator

공법	초시	적용초시 (ms)			
		심발부	확대부	바닥부	최외곽부
C-1		17	17	17	10
C-2		35	35	35	10
C-3		47	30	30	10
C-4		47	35	35	10
C-5		50	50	50	10
V-1		11	11	11	10
V-2		33	33	33	10
V-3		11	33	33	10
V-4		27	33	33	10
V-5		50	50	50	10

Table 3. The optimum delay time of electronic detonator (Supex-cut)

구분	전자 1회				전자 2회				전자 3회			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ms	13	13	11	9	42	6	79	77	78	10	8	8
최소 PVS (mm/sec)	5.32	2.22	3.21	4.53	9.83	11.58	4.60	3.05	6.01	5.00	6.17	4.01

### 4.3 현장 실험결과

#### 1) Cylinder-cut 과 V-cut을 사용한 최적 초시 결과

각 심발공법에서 시험적용초시는 기초시험을 통해 얻은 데이터를 합성하여 총 4가지의 초시조합을 사용하였고 적용초시는 다음과 같다. C-5 와 V-5 는 전자뇌관과 비교분석을 위해 일반뇌관초시를 적용하였다.

#### 2) Supex-cut을 사용한 최적 초시 결과

500ms 시차를 주고 단발발파 3회를 실시했다. 각 영역별로 계측한 데이터를 1ms~100ms 까지 1ms 단위로 합성한 결과 영역별 최적초시는 다음과 같다. 100ms 이후의 합성은 전체적인 발파 시간에 영향을 미치기 때문에 범위를 한정해서 합성하였다. 각각의 독립파형을 합성프로그램을 사용하여 합성한 결과는 다음과 같다.

8ms 이하는 제발효과에 의해 배제하고 인접한 9-11ms도 제외시켰다. 77-79ms 는 초시간격이 너무 커 외곽공 발파에 영향을 줄 수 있으므로 역시 제외시켰다. 13ms와 42ms를 각 1회씩 적용하였고 발파효과가 좋은 13ms를 다시 적용하였다.

#### 3) Cylinder-cut 과 V-cut을 사용한 발파 진동

진동계측 결과는 다음과 같다. Cylinder-cut 공법의 경우 C-4에서 계측기 한 개소 값을 제외하면 모든 초시조합의 PVS가 일반뇌관을 적용할 때의 초시보다 작게 나온 것을 알 수 있다. 17ms 적용 시 기존뇌관 적용초시(C-5)보다 22%의 PVS 저감효과가 나타났다. 현장 여건상 계측기 설치 및 여러 오차를 고려할 때 C-1, 즉 모든 영역을 17ms로 적용했을 때 발파진동 저감이 가장 탁월했다. 감쇄지수 n값의 경우는 진동의 역전현상으로 전자뇌관이 적게 측정되었으나, 반면 진동상수 K값의 경

Table 4. Results of Cylinder-cut blast vibration measurement

계측기	회차	PVS(mm/s)				진동상수(K)	감쇄지수(n)
		#5151	#5207	#5283	#9527		
C-1(전자)		3,25	3,06	1,84	2,51	102	0,910
C-2(전자)		5,04	4,63	2,29	2,10	1808	1,580
C-3(전자)		4,64	5,41	4,48	2,91	28,7	0,480
C-4(전자)		10,1	8,57	4,97	3,99	166	0,932
C-5(일반)		13,0	12,2	5,27	3,20	3430	1,750

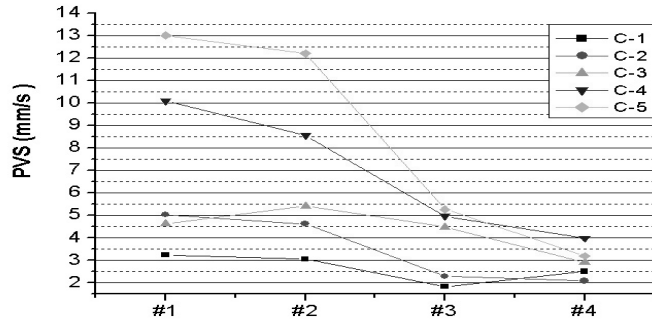
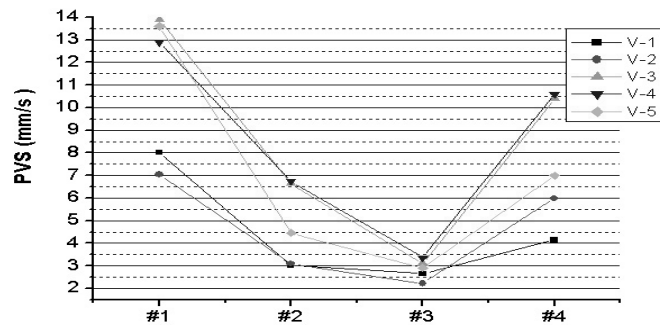


Table 5. Results of V-cut blast vibration measurement

계측기	회차	PVS(mm/s)				진동상수(K)	감쇄지수(n)
		#5151	#5207	#5283	#9527		
V-1(전자)		8,02	3,02	2,65	4,14	220	0,863
V-2(전자)		7,05	3,10	2,22	5,99	73,8	0,504
V-3(전자)		13,9	6,65	3,10	10,4	3066	1,24
V-4(전자)		12,9	6,75	3,37	10,6	542	0,833
V-5(일반)		13,6	4,46	2,92	7,00	6518	1,550



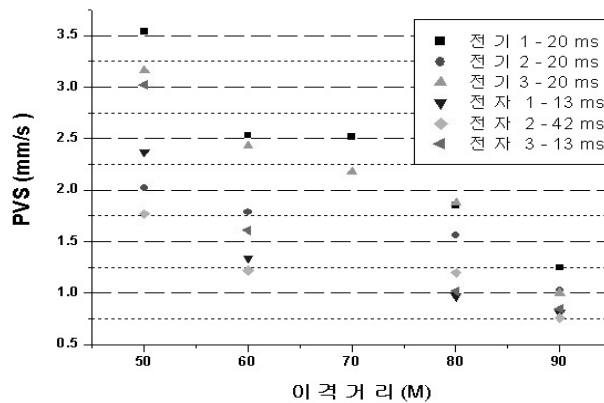
우는 PVS가 최소인 C-1의 경우 90 % 이상의 감소효과를 보였다. V-cut 공법의 경우 V-1, V-2 (11ms, 33ms)를 적용했을 때 일반뇌관을 적용할 때의 초시보다

41%, 15%의 PVS 저감효과가 나타났다. 전체적인 진동 경향은 거리에 따라 감소하는 경향을 보였고, V-cut 마지막 측정값은 계측기의 오차 또는 설치의 부정확성에



Table 6. Results of blast vibration measurement (Supex-cut Wedge)

	이격거리 (m)	시험발파 1 전기 : 20ms 전자 : 13ms	시험발파 2 전기 : 20ms 전자 : 42ms	시험발파 3 전기 : 20ms 전자 : 13ms	평균 PVS (mm/sec)
전기뇌관	50	3.54	2.02	3.16	2.90
	60	2.53	1.79	2.43	2.25
	70	2.52	-	2.18	2.35
	80	1.85	1.56	1.88	1.76
	90	1.25	1.03	1.00	1.09
전자뇌관	50	2.37	1.77	3.02	2.38
	60	1.34	1.22	1.61	1.39
	70	-	-	-	-
	80	0.97	1.20	1.02	1.06
	90	0.81	0.76	0.85	0.80



기인한다고 할 수 있다.

#### 4) Supex-cut을 사용한 발파 진동

심발부분만 전자뇌관을 적용했기 때문에 심발과 전체 영역을 구분하여 비교하였다. 전자뇌관을 적용했을 때 약 33% 진동 저감 효과가 있었다.

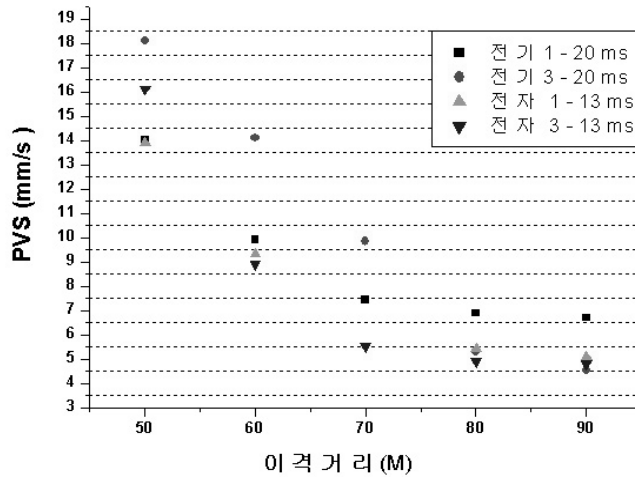
일반적으로 전체 PVS 값이 심발 PVS보다 큰 것을 볼 수 있는데 이는 외곽공의 지발당 장약량이 많았기 때문으로 볼 수 있다. 전체 진동을 비교하면 최적초시를 적용한 전자뇌관을 사용했을 때 약 18%의 진동 저감효과가 있었다. 심발영역과 주변영역의 공수와 지발당 장약량이 거의 같다고 봤을 때 심발영역의 잔여진동이 주변영역의 진동에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 강원도 영월 삼성 석회석 광산과 경부고속철도 13-3 공구 터널현장의 시험발파를 통하여 얻어진 계측 결과를 토대로 작성된 것이다. 전자뇌관을 사용하여 두개의 장약공에 시간 차이를 주고 발파할 경우 파의 특징인 상호 간섭현상이 발생한다. 이러한 파의 간섭현상은 중첩을 통하여 파가 서로 증폭이 되거나 상쇄가 된다. 따라서 이러한 파의 특성을 이용하여 시험발파 시 단공 발파를 통한 발파진동 계측데이터를 수집하여 각각의 파형을 분석 및 합성하여 최적 지연 초시를 찾고 이 최적초시를 전단면에 단발로 적용하여 그 효율성을 입증하는데 이번 실험의 목적이 있다. 기존뇌관(전기, 비전기뇌관)

Table 7. Results of blast vibration measurement (Supex-cut)

	이격 거리 (m)	시험발파 1 전기 : 20ms 전자 : 13ms	시험발파 2 전기 : 20ms 전자 : 42ms	시험발파 3 전기 : 20ms 전자 : 13ms	평균 PVS (mm/s) (2회발파제외)
전기뇌관	50	14.0	-	18.1	16.05
	60	9.92	8.45	14.1	12.01
	70	7.45	-	9.84	8.65
	80	6.89	5.80	5.29	6.09
	90	6.70	3.99	4.54	5.62
전자뇌관	50	13.9	-	16.1	15
	60	9.32	-	8.91	9.11
	70	-	5.48	5.52	5.52
	80	5.44	4.13	4.92	5.18
	90	5.09	4.07	4.81	4.95



과 전자뇌관(최적초시적용)의 시험 결과에 대한 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구는 전자뇌관으로 가능한 초시조합을 사용하여 기존뇌관으로는 적용할 수 없는 초시 적용 후 발파효율을 비교하기 위하여 실시하였다.
2. Cylinder-cut (17ms), V-cut (11, 33ms) 적용했을 때 기존뇌관 적용초시보다 각각 22%와 41%, 15%의 발파진동 저감효과가 나타났고 Cylinder-cut 공법의 경우 계측기 한 개소 값을 제외하면 모든 초시조합의 진동치가 기존뇌관을 적용할 때의

초시보다 감소했다.

3. Supex-cut을 적용했을 때 발파진동에서 일반적으로 전체 PVS 값이 심발 PVS보다 큰 것을 볼 수 있는데 이는 외곽공의 지발당 장약량이 많았기 때문으로 볼 수 있다. 심발부분만 비교하면 전자뇌관 (13, 42ms)을 적용했을 때 최대 PVS가 전기뇌관보다 약 33% 감소되었다. 또한 전체 PVS는 전자뇌관을 사용한 경우 전기뇌관보다 약 18% 진동 저감 효과가 있었다. 기본실험과 전자뇌관을 이용한 실험모두 심발영역과 주변영역의 공수와 지발당 장약량이 거의 동일하기 때문에 심발영역의 잔여진동이

주변영역의 진동에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 전체 PVS가 전자뇌관을 사용했을 때 작게 나온 것은 증첩에 의한 감쇄효과로 잔여진동이 거의 소멸되어 주변영역의 진동에 영향을 미치지 않았기 때문이라고 볼 수 있다.

4. 정확하고 신뢰성 있는 파형합성과 실제 발파파형의 유사성을 입증하기 위해서 다량의 기초데이터 확보와 암중에서 대표되는 기준데이터를 설정해야 할 것으로 판단된다.

기준뇌관의 정형화된 초시(20, 25ms)가 아닌 전자뇌관을 사용하여 Cylinder-cut(17ms), V-cut(11, 33ms), Supex-cut(13, 42ms) 등의 새로운 초시를 적용한 경우 발파진동감소 측면에서 탁월한 효과를 입증하였다. 다양한 암질에서 단발 시험발파를 통해 다량의 파형을 획득하고 적정 장약량을 산출하여 파형합성을 통해 최적초시를 도출하여 현행 제발발파가 아닌 단발발파로서 발파를 한다면 발파진동의 최소화를 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술

평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

This paper was funded by the Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning under the Ministry of Construction and Transportation in Korea (Grant No. 04-C01).

## 참고문헌

1. 윤지선(1992), 최신 발파기술, 구미서관, pp. 12-23.
2. 이상현, 윤지선, 조영근, 안봉도(2004), "전자기폭시스템을 활용한 터널 시공사례", 화약·발파, 대한화약발파공학회, 제22권 제1호, pp. 23-31.
3. 윤지선, 조영근, 이형원(2001), "외국의 전자뇌관의 시공사례와 그 실효성에 관한 고찰", 대한 토목학회 초청 및 구두발표논문 초록집, pp. 215.
4. 이한빈(2005), 터널에서 장공발파 굴착공법에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대학교, pp. 7-8.
5. 선우춘, 류창하(2000), "발파진동 측정에 대한 고찰", 화약·발파, 대한화약발파학회, vol. 18, No.4, pp. 7-17.
6. Charles H. Dowding(1985), Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice-Hall, pp. 227-228.



**윤지선**

인하대학교 환경토목공학과 교수  
jyoon@inha.ac.kr



**김도현**

(주)바우컨선타트 지반터널부 사원  
extrani@hanmail.net